

不釣り合い振動を考慮した磁気軸受の H_∞ DIA制御

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26792

氏名	瀬戸 洋紀
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第944号
学位授与の日付	平成19年9月28日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	不釣合い振動を考慮した磁気軸受の H_∞ DIA 制御
論文審査委員(主査)	滑川 徹(自然科学研究科・准教授)
論文審査委員(副査)	村本 健一郎(自然科学研究科・教授), 木村 春彦(自然科学研究科・教授), 山田 外史(環日本海域環境研究センター・教授), 岩田 佳雄(自然科学研究科・教授)

Abstract

This paper deals with an \mathcal{H}_∞ DIA control of Magnetic Bearings considering unbalance vibration of rotor.

We derive the two types of magnetic bearing models. First, we expressed the neglected phenomenon due to various assumptions as the disturbance given to the system, then, the mathematical model was derived considering that. Second, magnetic bearings have some hard control problems including the gyroscopic precession and unbalance vibration yielding from a rotational dynamical standpoint. For these reasons, we regarded the unbalance vibration of rotor as the periodic disturbance and consider the periodic disturbance caused by unbalance of rotor, which synchronized with rotational frequency. Then, the mathematical model considering the gyroscopic precession and unbalance vibration could be derived.

Two types of control system design were performed for these mathematical models, and evaluated the controllers to carry out the control experiments. First, for the mathematical model considering the system disturbances, we constructed the generalized plant introduced the frequency weighting functions characterized the system disturbances and the weight parameters for state variables and control inputs. Consequently, we can design the \mathcal{H}_∞ DIA controllers on frequency domain using frequency weighting functions, and can achieve the desired time responses using weight parameters for state variables and control inputs. Therefore, \mathcal{H}_∞ DIA controllers were designed using above generalized plant. The experimental results showed the effectiveness of \mathcal{H}_∞ DIA control system design methodology.

Second, for the mathematical model considering the unbalance vibration, we reconstructed the generalized plant can be suppressed the unbalance vibration to introduce another frequency weighting function for periodic disturbance. We can get the controllers possessed some peaks at specified frequency by selecting the weighting functions which have a peak at specified frequency. Such controllers could be shown a good attenuation property of unbalance vibration at specified frequency. Therefore, this proposed methodology could be designed the controllers satisfied the DIA condition while it has the ability to attenuate periodic disturbance via rotor unbalance. The experimental results showed that the proposed robust control approach provides the better attenuating property of unbalance vibration and transient property.

Finally, we proposed the control system design methodology which can be achieved both a better transient and attenuating property of unbalance vibration of rotor by using \mathcal{H}_∞ DIA control considering the unbalance vibration, then, illustrated the effectiveness of this proposed method by some control experiments.

論文要旨

磁気軸受は、磁力によってロータを非接触で支持できるため空間を自由に移動させることが出来るシステムである。そのため、このシステムは磨耗や摩擦がなく、低振動で低騒音、高速回転可能で特殊環境下で使用できるなどの利点を持つ。一方で、高コスト、故障対策の必要性などの問題がある。また、回転機械である磁気軸受は、ロータの高速回転時に「ジャイロ効果」や「振れ回り振動」などの制御問題を生じ、制御性能が劣化する原因となっている。

本論文では、良好な過渡応答特性を有する \mathcal{H}_∞ DIA 制御を磁気軸受に適用し、さらに、不釣合い振動を考慮した \mathcal{H}_∞ DIA 制御を提案し、その有効性を明らかにした。 \mathcal{H}_∞ DIA 制御は、外乱と初期状態の不確かさの混合減衰 \mathcal{H}_∞ 制御であり、 \mathcal{H}_∞ 制御の一種である。 \mathcal{H}_∞ DIA 制御は、従来の \mathcal{H}_∞ 制御と比較して良好な過渡応答特性を有し、磁気軸受の制御性能の改善が期待できる。さらに、従来の \mathcal{H}_∞ 制御と同様に \mathcal{H}_∞ DIA 制御も一般化プラントの構成により制御系に様々な特性を持たせることが可能となる。本研究では特に、不釣合い振動の補償に焦点を絞り、良好な過渡応答特性を有する \mathcal{H}_∞ DIA 制御に不釣合い振動補償を考慮することで、良好な過渡応答特性と不釣合い振動の

抑制効果の両方を有する制御系設計手法を提案し、この制御系の有効性を明らかにした

本論文は、全7章で構成されており、以下に主要な結果をまとめて述べる。

第1章

本論文の背景と磁気軸受の制御に関する従来研究とその問題点を示し、研究の目的を明示した。

第2章

本章では、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御について述べた。本制御は、従来の \mathcal{H}_∞ 制御と同様に、2本の Riccati 方程式とカップリング条件から Riccati 解 P, M を求める。ここで、コントローラが決定する。さらに、初期状態の不確かさに対する許容度を解析するために、新たな条件式により計算する。これにより、初期状態の不確かさの許容度を数値的に知ることができ、この評価指標を元にコントローラの設計に反映させることが出来るため、より初期状態の不確かさに強いコントローラを設計することが可能となる。また、この初期状態の不確かさに対する許容度は過渡応答特性に対する指標にもなっており、許容度が高いコントローラは、より良好な過渡応答特性を示すことが分かっている。

第3章

本章では、4軸制御型磁気軸受のモデリングについて述べた。モデリングの際には、実際のシステムを忠実に再現したモデルを導出することは困難であり、実際には、以下のような現象を不確かさとして考慮せざるを得ない。

- 磁気軸受の電磁石に存在する非線形性。
- モデル化されなかった高次のダイナミクス。
- モデルのパラメータの誤差。

そこで、これらの不確かさの影響を系に加わる外乱としてモデリングした。

第4章

本章では、前章に続き4軸制御型磁気軸受に対して不釣り合い振動を考慮したモデリングを行った。回転機械は、工作の誤差、材料の不均一などの原因により重心と形状中心（形心）の間に僅かな偏心が存在する。このような偏心により回転機械である磁気軸受は、ロータを高速回転させることにより、回転体の力学上生じる「ジャイロ効果」や「振れ回り振動」などの困難な制御問題が存在する。本論文では、特に、振れ回り振動を考慮した数学モデルの導出をした。具体的には、ロータの不釣り合いにより発生する振れ回り振動を回転周波数に同期する周期的外乱とみなし、モデリングを行った。これにより、前章の外乱を考慮したモデリングに加えて、周期的外乱を考慮したモデリングを行なうことで、振れ回り振動も考慮した数学モデルを導出できた。

第5章

本章では、第3章で導出された数学モデルを用いて、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御系設計を行った。不確かさの影響を系に加わる外乱として考慮した数学モデルに対して、それらの外乱を特徴付ける周波数重み関数と状態変数と制御入力に対する重みを導入した一般化プラントを構築した。これにより、周波数重み関数により周波数領域における設計が可能となり、さらに、状態変数と制御入力による重みにより、時間領域から望ましい時間応答特性を目指すことが可能となった。以上、得られた一般化プラントを用いて、 \mathcal{H}_∞ DIA コントローラを設計した。制御実験による検証では、積分型状態フィードバック制御と比較を行った。具体的には、次に示す3種類の応答を取得して比較した。

- ステップ幅 0.05[mm] のステップ目標値応答。
- 定常吸引力の $\frac{1}{6}$ 程度の力を加えた場合のステップ外乱応答、ロータの質量を変動させた場合の外乱応答。
- 制御開始時のロータの位置を任意の位置に固定することで、初期状態を適当に変化させることができる。この状態で制御することで変動した初期状態から定常状態へ移行する応答を得ることが出来る。これを、初期値応答とした。

まず、目標値応答を比較してみると、積分型状態フィードバック制御の方が \mathcal{H}_∞ DIA 制御よりも若干性能がよくなった。これは、状態フィードバック制御と出力フィードバック制御の違いによるもので、状態フィードバック制御の方が全ての状態を用いて制御することが出来るため、良好な目標値応答を得ることが出来たと考えられる。続いて、外乱応答に関しては、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御の方が、より外乱除去特性に優れることが分かった。さらに、ロータの質量を変動させた場合の外乱応答に関しても、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御の方が良好な外乱除去特性を示していた。最後に、初期値応答に関しても、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御の方がアンダーシュートが小さく抑えられ、良好な応答を示していた。

結果的に、状態フィードバック制御と出力フィードバック制御の制御方式の違いによる制御性能の差異はあるもの

の、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御の方がロバスト安定性に優れ、初期状態の不確かさにも頑強であることが分かった。

第6章

本章では、第4章で導出された不釣り合い振動を考慮した数学モデルを用いて、 \mathcal{H}_∞ DIA 制御系設計を行った。

振れ回り振動を考慮したモデリングでは、前章で作成した一般化プラントに対して、新たに周期的外乱を抑制するために重み関数を導入し、振れ回り振動を抑える一般化プラントを再構築した。重み関数としては、ある特定の周波数でハイゲインになるような伝達関数を選ぶことで、コントローラのゲイン線図上にピークを持たせることができ、その特定の周波数付近で制御性能を改善させることできる。これが、結果的に、振れ回り振動の抑制につながると考えられる。これにより、先ほどの外乱のみを考慮した一般化プラントに比べて、周期的外乱を考慮した制御系設計が可能となった。この一般化プラントにより設計されたコントローラは DIA 条件を満たすと同時に、振れ回り振動を補償することが可能であるといえる。よって、良好な過渡応答特性を有するとともに特定の周波数成分をもつ振れ回り振動を効果的に減衰させることできる。

続いて、実際に、 \mathcal{H}_∞ DIA コントローラを設計し、磁気軸受を用いた制御実験により制御性能の検証を行った。具体的には、16.67[Hz]と25[Hz]にピークをもつ2種類のコントローラを設計した。それぞれのコントローラに対して、回転実験を行い性能を検証した。本磁気軸受は回転機構を持たないため、制御実験は回転数が減少する場合のみで行った。ロータを高速回転させ、回転数が減少してきたときの応答を確認した。結果としては、それぞれピークを持つ周波数の不釣り合い振動を抑制することが出来た。しかし、この制御実験では、一定回転数での検証が出来ないため、不釣り合い振動を抑えるのはピークの周波数と不釣り合い振動の周波数が一致したときのみとなる。しかし、一定回転数での不釣り合い振動の抑制効果を確認するため、静止浮上状態でコントローラのピーク周波数と同じ正弦波をシステムへ入力した場合、連続的に不釣り合い振動を抑制することが出来た。これにより、一定回転数における不釣り合い振動の抑制効果を確認できた。

以上より、良好な過渡応答特性を有する \mathcal{H}_∞ DIA 制御に不釣り合い振動補償を考慮することで、良好な過渡応答特性と不釣り合い振動の抑制効果の両方有する制御系設計手法を提案し、この制御系の有効性を明らかにした。

第7章

本論文で得られた結果と今後の課題について述べた。

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成19年8月3日に第1回審査委員会を開き、面接調査を行った後、論文内容を詳細に検討した。さらに、同日行われた口頭発表の後に第2回審査委員会を開き、協議の結果以下のように判定した。

本研究では、良好な過渡応答特性を有する外乱と初期状態の不確かさの混合減衰 H^∞ 制御を磁気軸受に適用し、不釣合い振動を考慮した H^∞ DIA 制御法を提案した。これにより良好な過渡応答特性と不釣合い振動の抑制効果の両方を有する磁気軸受を構成した。

まず制御対象である4軸制御型磁気軸受に対して、不確かさの影響をシステムに加わる外乱とした数学モデルとさらにロータの不釣合いにより発生する振れ回り振動を周期的外乱として考慮した2つの数学モデルを導出した。つぎにこれらの数学的モデルに対して外乱を特徴付ける周波数重み関数と状態変数と制御入力に対する重みを導入した一般化プラント及び H^∞ DIA コントローラを設計し、その有効性を明らかにした。特に振れ回り振動を考慮したモデルに対しては、周期的外乱を抑制するための新たな一般化プラントとコントローラを提案・設計した。このコントローラは DIA 条件を満たすと同時に、振れ回り振動を補償する。最後に実際に制御実験により制御性能の検証を行い、不釣合い振動に対する抑制効果を確認した。

これらの結果は不釣合い振動を抑制する磁気軸受のロバスト制御を実用化する上で極めて有用な結果と結論できる。よって、本論文は博士（工学）論文に値する。